ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Том 51 **1929**

Экспериментальное исследование процесса образования металлической стружки

А.М. Розенберг

В статье, фрагменты которой представлены ниже, изложены результаты экспериментальных исследований элементов механики процесса резания, которые послужили основой для развития этого важнейшего раздела теории резания металлов и сохранили, в известной мере, свое значение до настоящего времени.

В 1848 году француз Coquilhat произвел опыты на сверлильном станке, с целью определения расхода работы на превращение в стружку единицы объема различных материалов. Это была первая зарегистрированная в литературе попытка исследовать явления, связанные с обработкой металлов резанием. С тех пор, в течение 80-ти лет, в этой области было произведено большое количество разнообразных опытов и исследований.

В результате всех исследований мы имеем в настоящее время науку, именуемую "теорией резания металлов". Однако, при ближайшем знакомстве с этой наукой, можно убедиться в почти полном отсутствии в ней "теоретичности". Она представляет собой ни что иное, как собрание экспериментально полученных и строго проверенных фактов, связанных цепью эмпирических зависимостей, более или менее полно охватывающих трактуемый вопрос, т.е. сплошную эмпирику, без сколько нибудь солидной теоретической базы.

Были попытки подвести теоретический фундамент под некоторые явления, происходящие при резании металлов, но все они не увенчались успехом и причину этого нужно искать в том, что до сих пор фактически мы все еще не имеем достаточно исчерпывающих сведений о самой основе всего процесса, именно о явлениях, происходящих в металле при образовании из него стружки.

Опыты, проведенные в этом направлении, не дали согласованных результатов в толковании отдельных вопросов, как не дали и общей стройной картины процесса образования стружки. Некоторые, имевшие место, теоретические исследования вопроса, базируясь на недостаточно полно проведенных опытах предшественников, были насыщены гипотетическими предпосылками авторов относительно течения процесса, априорными предположениями и обобщающими коэффициентами, потому могли дать лишь относительно ценные результаты, и представляют интерес в разрезе истории исследования данного вопроса.

Так как при образовании стружки все явления происходят далеко за пределом упругости, который до сего времени является пределом наших знаний в науке о сопротивлении материалов, то исследование процесса возможно пока только путем эксперимента и, только лишь тогда, когда будет накоплено достаточно опытного материала, возможен будет переход к теоретической разработке вопроса и подведению теоретической основы.

С этой точки зрения ценен всякий более или менее тщательно поставленный эксперимент, расширяющий пределы наших знаний, или даже только подтверждающий ранее найденные положения.

Первоначальной целью нашей работы являлось:

1. Проверка данных проф. Тиме относительно углов скалывания β_1, их постоянства при постоянном угле резания α и характера изменений их с изменением α. Этот вопрос являлся интересным потому, что во всех ранее проведенных исследованиях углы β_1 измерялись на боковой поверхности образца и могли быть несколько иными в силу искажений, чем в толще материала. Мы намеревались измерять их в среднем сечении образца.
2. Определение глубины распространения пластических деформаций перед резцом и под ним, в обработанной уже поверхности, при различных углах резанья и толщинах снимаемого слоя.

Попутно был затронут вопрос об усадке стружки и выяснена зависимость коэффициента усадки от различных причин, а также некоторые иные явления, связанные с процессом образования стружки, что станет ясным из последующего изложения. В нашей работе мы остановились на металлографическом методе исследования, причем для выявления структуры применили травление по методу Fry, что дало возможность, кроме основной структуры, получить точную картину пластических деформаций в любом сечении образца.

Метод Fry, появившийся в литературе в 1921 г., в последующие годы был подвергнут строгой проверке путем целого ряда работ, при чем были найдены наилучшие условия его применения и использования. Сущность его заключается в следующем.

Пластически деформированный образец отжигается в течение 30 мин. при температуре 200°С, после чего разрезается в интересующем месте, шлифуется до шкурки № 00000 и, наконец, травится реактивом следующего состава (в случае макро-шлифа):

воды – 100 см³.

крепкой соляной кислоты – 120 см³.

хлорной меди ($CuCl_2$) – 90 гр.

Травление продолжается от 0,5 до нескольких минут, после чего остатки реактива со шлифа смываются соляной кислотой (во избежания осаждения на нем меди); шлиф обмывается водой и обсушивается. Часто для большей ясности картины описанное травление сменяется осторожной шлифовкой окисью алюминия на суконном диске, с повторением травления после шлифовки, и так несколько раз.

Материалом для наших опытов было взято мягкое, малоуглеродистое полосовое железо, дающее при травлении по описанному методу ясную картину. Из него были приготовлены образцы размерами 180×50×6 мм и частью размерами 210×50×6 мм. Опыты велись главным образом на строгальных станках.

Резцы при опытах употреблялись из быстрорежущей стали с теоретическим профилем, прямолинейным лезвием и плоской передней гранью, с углами резания α (см. рис. 1) 45°, 55°, 65°, 75°, 85°. Угол задней заточки у всех резцов был γ=8°...10°. Углы резания проверялись при каждой установке резца помощью угломера с точностью до 1°.

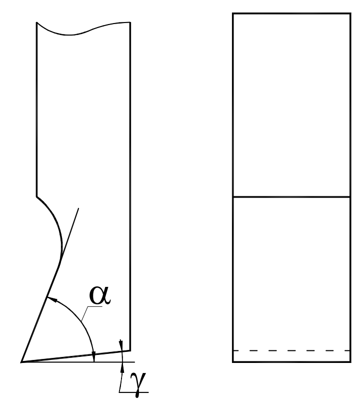


Рис. 1.

Для опыта каждый образец зажимался между полосами углового железа и закреплялся на столе строгального станка так, что одна из предварительно опиленных кромок образца длиной 180 *мм* и шириною 6 *мм* оказывалась параллельной плоскости стола и предназначалась для снимания стружки.

Длина хода обыкновенно бывала 80...120 *мм*, после чего или стол выключением мотора внезапно останавливался, или получал, путем соответствующей установки кулачков, перекидывающих ремень, перемену направления движения. Ив том и другом случае снятая стружка оставалась соединенной с основным телом образца. После этого образец снимался со стола станка и устанавливался следующий.

Образец со снятой стружкой подвергался обмеру. Измерялась длина прохода резца l_0 и длина полученной стружки l_1 (с точностью до 0,5 *мм*), это служило в дальнейшем для вычисления коэффициента продольной усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$. Длина стружки измерялась гибкой нитью и всегда по стороне, прилегающей к резцу (то есть по внешней). После обмера стружка вместе с прилегающей частью материала отрезалась ножовкой и подвергалась получасовому отжигу при температуре 200°С, для чего малые стружки помещались в кипящую нафталиновую ванну (t=218°С), большие же отжигались в электрической печи сопротивления с железной обмоткой, типа "Hereys". После отжига образец со стружкой разрезался вдоль, шлифовался и травился согласно указанному порядку.

После этого определялась действительная толщина снимаемого слоя (глубина резания), для чего шлиф помещался в проекционный микроскоп и на матовом стекле фотокамеры микроскопа при увеличении в 10...20 раз являлась возможность произвести измерение с точностью до 0,025 мм. Здесь же производились все другие, интересующие нас, измерения и в большинстве случаев шлиф фотографировался.

В порядке изложения прежде всего коснемся вопроса об усадке стружки. То обстоятельство, что снятая стружка получается короче, чем пройденный резцом путь, замечено было очень давно и рядом опытов (первые были произведены проф. Тиме) было установлено, что коэффициент продольной усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$

вообще говоря, изменяется с изменением качества материала, угла резания и толщины стружки и всегда меньше единицы; но все же, несмотря на видимую простоту явления и на легкость его исследования, не касаясь внутреннего механизма явления усадки, до сих пор нет единого мнения о зависимостях коэффициента усадки от вышеупомянутых факторов.

С целью выяснения зависимости коэффициента продольной усадки от всех приведенных выше причин, нами производились обмеры почти всех снимаемых стружек, предназначенных для приготовления шлифов и травления. Кроме того, были произведены дополнительные опыты, целью которых являлось установление зависимости коэффициента продольной усадки от глубины резания (толщины снимаемого слоя δ) при всех углах резания. В этих опытах снимались стружки различной толщины, начиная от 0,03 *мм*. Для того, чтобы исключить влияние переменной толщины стружки при начале и конце резания, т.к. в первом случае резец идет, углубляясь в материал, во втором же обыкновенно отрывает лишние кусочки материала, отступя на 10 *мм* от краев образца делались прорез ножовкой, которые ограничивали стружку одинаковой толщины. Естественно, при вычислении коэффициента усадки за длину хода резца (l_0) принималась длина между прорезами. Ввиду того, что при очень тонких стружках непосредственное измерение толщины стружки могло дать значительные ошибки, толщина определялась методом взвешивания полученной стружки. Вес определялся на аналитических весах с точностью до 0,005 грамма. Определив вес каждой стружки, определив также заранее удельный вес железа можно было найти объем материала, заключенного в стружку, зная же длину прохода резца (длину между прорезами ножовкой) и ширину образца, нетрудно было вычислением получить точную величину толщины снимаемого слоя (глубины резания). Удельный вес железа нами был получен как среднее из нескольких взвешиваний равным 7,85, причем в пределах двух знаков после запятой не получалось разницы между удельным весом основного материала и удельным весом стружки. Для некоторых случаев измерялась, кроме указанного, ширина полученной стружки. Результаты произведенных измерений для угла резания α=45° приведены в таблице 1, для угла α=55° – в таблице 2 и для α=65° – в таблице 3. При углах 75 и 85 мы, как правило, не получали целой стружки, она обыкновенно была разделена на отдельные элементы, что препятствовало измерению длины стружки.

Таблица 1. *Усадка стружки при α=45°*

№ по порядку	№ образца	Толщина снимаемого слоя δ, мм	Длина прохода резца l_0, мм	Длина снятой стружки l_1, мм	Коэффициент усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Ширина до снятия стружки b_0, мм	Ширина снятой стружки b_1, мм	Примечание
1	46	0,07	80,0	40	0,50	6,2	6,2	Глубина резания (толщина снимаемого слоя) определена методом взвешивания
2	40	0,08	-//-	41,5	0,52	-//-	6,2	
3	47	0,13	-//-	41,5	0,52	-//-	6,22	
4	42	0,16	-//-	43,5	0,54	-//-	6,22	
5	41	0,18	-//-	43,0	0,54	-//-	6,24	
6	45	0,20	-//-	46,0	0,57	-//-	6,24	
7	43	0,29	-//-	45,0	0,56	-//-	6,3	
8	44	0,52	-//-	47,0	0,59	-//-	6,4	
9	77	0,5	-//-	41,0	0,51	-//-	-	
10	74	0,35	87,0	46,0	0,53	-//-	-	
11	73	0,8	46,0	27,0	0,58	-//-	-	
12	103	1,0	136,0	83,0	0,61	-//-	-	
13	35	1,2	98,0	49,5	0,51	-//-	-	
14	101	1,6	140,0	91,0	0,65	-//-	-	
15	106	1,75	99,0	67,0	0,68	-//-	-	
16	104	1,85	122,0	89,0	0,73	-//-	-	
17	105	2,2	126,0	92,0	0,73	-//-	-	
18	107	4,0	66,0	46,0	0,70	-//-	-	

Из рассмотрения таблиц можно, прежде всего, усмотреть вполне определенную тенденцию к повышению коэффициента усадки с увеличением толщины снимаемого слоя. Повышение коэффициента усадки вполне ясно выражено и для малых величин δ идет быстрее, чем для больших. При угле резания α=65° мы видим некоторое колебание значений коэффициента усадки для малых величин δ. Это колебание нетрудно объяснить тем, что при α=65° некоторые тонкие стружки у нас получались состоящими из связанных

между собой элементов (суставчиков); такие стружки имели очень большую усадку, очень малую величину K_0. Другая же часть тонких стружек имела вполне сливное строение и коэффициенты усадки для них имели более высокое значение.

Таблица 2. *Усадка стружки при α=55°*

№ по порядку	№ образца	Толщина снимаемого слоя δ, мм	Длина прохода резца l_0, мм	Длина снятой стружки l_1, мм	Коэффициент усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Ширина до снятия стружки b_0, мм	Ширина снятой стружки b_1, мм	Примечание
1	13	0,03	194	67	0,35	6,2	6,22	Толщина снимаемого слоя δ определена методом взвешивания
2	20	0,04	-//-	73,5	0,38	-//-	6,3	
3	14	0,07	-//-	78,5	0,40	-//-	6,34	
4	30	0,08	-//-	79,5	0,41	-//-	6,35	
5	146	0,13	123	55,0	0,45	-//-	-	
6	29	0,16	88	40	0,45	-//-	6,45	Толщина снимаемого слоя δ определена методом взвешивания
7	15	0,2	194	93	0,48	-//-	6,4	
8	28	0,31	88	40	0,45	-//-	6,5	
9	23	0,44	194	93	0,48	-//-	-	
10	12	0,45	-//-	90	0,47	-//-	6,7	
11	22	0,70	88	47	0,54	-//-	6,9	
12	148	0,25	37,5	16,5	0,44	-//-	6,25	
13	147	0,30	46,0	21,5	0,47	-//-	6,4	
14	151	0,60	52	24	0,46	-//-	6,47	
15	149	0,78	46	22	0,48	-//-	6,62	
16	26	1,1	124	66,5	0,54	-//-	-	
17	25	1,35	142	83,5	0,59	-//-	-	
18	21	1,45	156	87,0	0,56	-//-	-	
19	24	1,8	143	82,5	0,58	-//-	-	
20	108	2,0	71	40	0,56	-//-	-	
21	20	2,0	100	53	0,53	-//-	-	
22	1	2,1	109,5	58,5	0,54	-//-	-	
23	19	2,3	120	72	0,6	-//-	-	
24	166	2,5	101	67,5	0,67	-//-	-	
25	2	2,6	78	47,5	0,61	-//-	-	
26	109	2,65	139	80	0,58	-//-	-	
27	3	3,2	102,5	67,5	0,66	-//-	-	
28	23	4,1	65	44	0,68	-//-	-	
29	79	0,4	92	43	0,47	-//-	-	

Можно констатировать ошибку проф. Савина, полагающего, что усадка увеличивается с увеличением толщины снимаемого слоя. Мы видим зависимость совершенно обратного характера. При этом коэффициент усадки изменяется в гораздо более широких пределах, чем это предполагал проф. Тиме для железа и это особенно заметно при α=65°, где K° колеблется от 0,23 до 0,78. При α=55° имеем колебание от 0,35 до 0,68, при α=45° от 0,5 до 0,73.

При рассмотрении фотографий, относящихся к углу резания α=55° и расположенных в порядке увеличения толщины снимаемого слоя (глубины резания), бросается в глаза резкая граница между стружкой и основным металлом. Граница эта для тонких стружек почти точно прямолинейная, переходит при толстых стружках в ломанную, состоящую из двух прямых, линию, одна из которых идет от кончика резца в направлении его движения, другая под некоторым углом пересекает первую и ее ограничивает. В тонких стружках граница видна яснее и легче выявляется при травлении, чем в толстых, где ее выявить удается лишь после нескольких чередующихся шлифовок и травлений, причем не исключена возможность перетравить и окончательно потерять ясность изображения. Схематическое представление этих границ нами дано прямыми ABC на рис. 2, где проставлены и другие обозначения, необходимые нам в дальнейшем.

Таблица 3. *Усадка стружки при α=65°*

№ по порядку	№ образца	Толщина снимаемого слоя δ, мм	Длина прохода резца l_0, мм	Длина снятой стружки l_1, мм	Коэффициент усадки $K_0 = \frac{l_1}{l_0}$	Ширина до снятия стружки b_0, мм	Ширина снятой стружки b_1, мм	Примечание
1	48	0,1	99	35	0,35	6,2	6,23	
2	52	0,1	-//-	33	0,33	-//-	6,3	
3	53	0,1	-//-	26	0,26	-//-	6,21	Делится на элементы
4	51	0,11	-//-	30	0,3	-//-	6,3	
5	50	0,2	-//-	32	0,32	-//-	6,75	
6	49	0,3	-//-	26	0,26	-//-	6,5...7,5	Делится на элементы
7	15 4	0,2	71,5	27,0	0,38	-//-	6,40	
8	15 6	0,4	70,5	21,5	0,30	-//-	7,25	Делится на элементы
9	75	0,5	45	15	0,33	-//-	-	
10	157	0,5	68	15,5	0,23	-//-	6,9	Делится на элементы
11	15 5	0,55	37,5	12,5	0,32	-//-	7,35	-//-
12	15 8	0,55	73,5	21,5	0,29	-//-	7,2	-//-
13	38	0,6	156	42	0,27	-//-	-	-//-
14	110	1,6	123	49	0,40	-//-	-	
15	13	1,85	111	51	0,46	-//-	-	
16	111	2,1	112	57	0,51	-//-	-	
17	18	2,15	113,5	59	0,52	-//-	-	
18	114	2,7	90	58	0,64	-//-	-	
19	115	3,7	93	73	0,78	-//-	-	
20	17	4,3	66	41	0,62	-//-	-	
21	90	0,95	60	24	0,40	-//-	-	

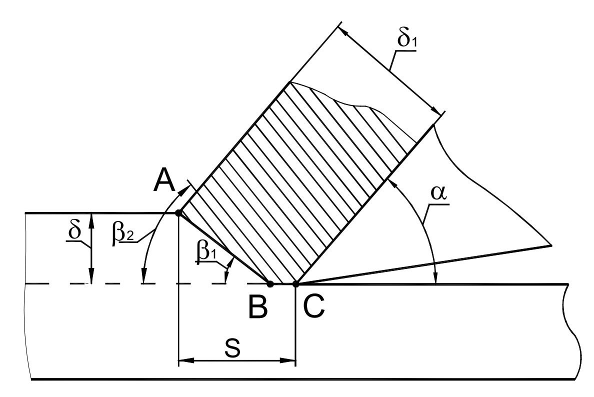


Рис. 2.

Затем очень ясно видно, что стружка вся как бы делится на тонкие, частые, параллельные между собой слои, распространяющиеся почти через всю толщину стружки и наклоненные под некоторым углом к прямолинейной границе между стружкой и основным металлом. Не трудно заметить, что граница стружки является геометрическим местом конечных точек этих слоев и ими собственно образуется. При большом увеличении (в 100...150 раз) можно различить, что слои состоят из чрезвычайно сильно деформированных зерен металла, вытянутых в направлении слоя, потому не представляет сомнения, что направление слоев дают нам направление скольжения зерен металла в процессе образования стружки.

Таким образом, процесс образования стружки представляет собой в данном случае последовательные сдвиги металла в направлении угла β_2 (рис. 2). Можно заключить, что линии сдвигов внутри стружки возникают в месте перехода обрабатываемой поверхности в стружку (точка А, рис. 2) и распространяются в направлении, обратном движению резца и под углом β_2 к нему. Границей распространения их является сторона угла β_1. Затем видно, что у поверхности резца линии сдвигов теряют свой прямолинейный характер, изгибаясь в направлении обратном движению стружки по резцу и в пределе принимая иногда направление параллельное передней грани резца; в тонких стружках загибание слоев не всегда заметно, в случае же большой толщины оно всегда имеется налицо.

Поверхность стружки, обращенная к резцу, не является ровной и гладкой, но покрыта значительными зазубринами, направленными своими острыми концами в сторону движения стружки по резцу. В случае малой толщины слоя иногда наблюдается почти полное отсутствие зазубрин, но большей частью хоть в зачаточном состоянии, но все же можно их обнаружить.

На поверхности, с которой уже снята стружка (будем в дальнейшем называть ее подрезцовой поверхностью), мы имеем также присутствие зазубрин, обращенных остриями в сторону обратную движению резца; они похожи на те, которые находятся на стружке, но имеют более правильную однообразную форму и расположены почти на одинаковых расстояниях друг от друга.

При малых δ мы получали при α=65° либо стружки, состоящие из отдельных элементов, либо соединенных вместе, но представляющие ясно суставчатое строение; нередко бывали случаи и совершенно сливных стружек. При увеличении толщины снимаемого слоя, стружка принимает определенно сливное строение. Во всех этих случаях мы опять ясно различаем и границу, отделяющую стружку от основного тела образца и направления сдвигов в самой стружке; как и при меньших углах резания, здесь сдвиги в стружке теряют при приближении к плоскости резца свой прямолинейный характер и загибаются в сторону, обратную движению стружки по резцу; на стороне стружки, прилегающей к резцу, и на подрезцовой поверхности имеем также наличие зазубрин, которые здесь особенно ярко выражены и при больших толщинах снимаемого слоя имеют иногда очень значительную величину.

Таким образом, в основном нет никакой разницы с тем, что мы имели ранее, за исключением того, что тонкие стружки делятся иногда на отдельные элементы, и рис. 2. точно также пригоден для схематического изображения процесса. Можно заключить, что разделение стружки на элементы происходит большей части отнюдь не в направлении линий сдвига (угол β_2), скорей можно предположить, что граница элемента образуется по направлению стороны угла β_1 и отделение элемента происходит по линии ограничивающей стружку. Линии сдвигов в отделившихся уже элементах делают весьма заметный угол с линиями раздела элементов.

Схема процесса образования стружки была дана проф. Тиме и послужила основанием для последующих работ в этой области. Тиме предполагал, что в случае резания вязкого материала все стружки, независимо от угла резания и материала, обязаны своим образованием процессу последовательного скалывания металла, в вполне определенном для каждого угла резания строго постоянном, направлении. Скалывание распространяется при этом прямолинейно от кончика резца к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку (точка А, рис. 2) и очередная линия скалывания представляет собой границу распространения деформаций в образце.

Разбирая пока лишь случай сливной стружки, можно сказать, что представление Тиме далеко не соответствует действительности. Никакого скола в направлении от кончика резца к точке перехода обрабатываемой поверхности в стружку мы не имеем. В этом направлении лишь имеется граница распространения деформаций в стружке, но и она прямолинейный характер имеет лишь при тонких стружках, превращаясь при более значительных величинах δ в ломанную линию. Линии сдвигов, образующие стружку всегда направлены под некоторым углом к упомянутой границе, никогда не совпадая с ней и распространяются не от резца вперед, а наоборот назад к резцу, возникая у точки перехода обрабатываемой поверхности в стружку; при этом скольжение происходит одновременно в многих плоскостях.



РОЗЕНБЕРГ АЛЕКСАНДР МИНЕЕВИЧ

(1902–1989)

Родился в Иркутске, в 1920 году поступил и в 1926 году окончил механический факультет Томского технологического института (ныне политехнический университет) и поступил в аспирантуру. С 1931 года заведовал кафедрой "Механическая обработка и сборка", а с 1938 по 1963 год — кафедрой "Станки и резание металлов". В 1938 году А.М. Розенбергу присуждена ученая степень кандидата технических наук, в 1940 году — доктора технических наук, с 1941 года — он профессор. С 1963 года А.М. Розенберг — заведующий отделом в Институте сверхтвердых материалов АН Украины.

А.М. Розенберг автор свыше 250 опубликованных работ, в том числе 12 монографий, посвященных проблемам обработки материалов резанием и холодным пластическим деформированием. Им подготовлено 42 кандидата наук, 12 из них стали докторами наук, создали собственные научные направления.

За большую научную, педагогическую и общественную работу А.М. Розенберг был награжден тремя орденами Трудового Красного Знамени, орденом "Знак Почета" и многими медалями.

ИЗВѢСТІЯ

Томскаго Технологическаго Института

Императора Николая II.

т. 18. 1910. № 2.

О коеффициенте резания металловъ

Т.И. Тихоновъ.

Образование стружки и ея видъ.

Явления резания впервые были подробно изучены профессоромъ Тиме и изложены имъ въ 1870 году въ его сочинении "Сопротивление металловъ и дерева резание". Профессоръ Тиме разсматриваетъ следующие случаи:

1) Снимание стружекъ съ вязкихъ металловъ (железо, сталь, свинецъ). Сначала резецъ вдавливается въ массу металла по направлению своего движения и масса сжимается. Сжатие распространяется, какъ это показалъ опытъ, не навесь снимаемый слой *ckgf* (фиг. 1, таб. IV), а только на некоторую долю его, ограниченную угломъ *acm*. Но какъ только давление на площадку резца *cm* превзойдетъ сопротивление срезыванию металла по *ac*, элементъ стружки *aomf* сдвигается по направлению *ac*, а резецъ начинаетъ сжимать уже следующий слой (фиг. 2). Элементъ образовавшейся стружки, вследствие сжатия металла, слегка поворачивается около точки *c* и такимъ образомъ получается изогнутая стружка, гладкая на поверхности, прилегающей къ резцу, и зазубренная на другой стороне резца. Такую стружку профессоръ Тиме назвала стружкою скалывания. При образовании такой стружки (фиг. 3) резко выделяются следующая характерныя величины: уголъ между направлениемъ движения и передней гранью резца α-уголъ резания; уголъ между обрабатываемой поверхностью и задней гранью резца γ-уголъ наклона и уголъ между передней гранью резца и плоскостью скалывания β-уголъ скалывания или уголъ действия.

Изъ опытовъ найдено, что сумма угловъ $\alpha+\beta$ для различныхъ металловъ при изммненении α изменяется весьма незначительно, такъ для чугуна

$\alpha=$	45°	55°	65°	75°	90°
$\beta=$	100°	90°	85°	75°	65°
$\alpha+\beta=$	145°	145°	150°	150°	155°

Отсюда мы видимъ, что при изменении α отъ 45° до 90° положение плоскости скалывания почти не изменилось.

Что касается кривизны стружки, то опыты показали, что радиусъ кривизны пропорционаленъ толщине снимаемаго слоя и обратно пропорционаленъ углу α.

Если мы сравнимъ длину снимаемаго слоя и длину получаемой стружки, то оказывается, что стружка значительно короче; при образовании стружки произошла усадка металла. Назовемъ длину снимаемаго слоя $L=\Sigma l$, длину стружки $L'=\Sigma l'$, то коеффицентъ усадки $\varphi=\frac{\sum l'}{\sum l}$; но изъ чертежа 3-го имеемъ, что

$$\frac{l'}{l}=\frac{\sin\beta'}{\sin\beta},$$

А значитъ

$$\varphi=\frac{\sin\beta'}{\sin\beta}.$$

Если взять крайние пределы для угла резания α, встречающиеся въ практике, то для

$$\alpha=45^\circ,\ \varphi=\frac{\sin\ (180^\circ-145^\circ)}{\sin\ 100^\circ}=0{,}6,$$

$$\alpha=75^\circ,\ \varphi=\frac{\sin\ (180^\circ-150^\circ)}{\sin\ 75^\circ}=0{,}5,$$

$$\alpha=90^\circ,\ \varphi=\frac{\sin\ (180^\circ-155^\circ)}{\sin\ 90^\circ}=0{,}42.$$

Действительно, непосредственный наблюдения показали, что коеффицентъ усадки для железа, стали и бронзы колеблется въ этихъ пределахъ; если и есть уклонение, то оно объясняется изменениемъ β.

Обращаясь къ чертежу 3-му и припоминая процессъ образования стружки, мы замечаемъ, что элементъ сжимаемой поверхности стружки *cm* находится въ известной зависимости отъ элемента скалываемой поверхности *ac*; все зависитъ отъ сопротивления металла сжатию и срезыванию; вообще можно допустить, что $cm=ac\ \xi$, а следовательно

площадь стружки $\omega=\xi\ (ac)^2$, но $ac=\frac{\text{толщина стружки}}{\sin\beta'}$

(см. черт. 3-й), а потому

$$\omega=\xi\frac{t^2}{\sin^2\ \beta'}.$$

Что касается вида самой стружки, то онъ сильно зависитъ отъ угла резания; при маломъ угле резания сдвигъ элементовъ стружки незначительный, элементъ имеетъ форму трапеции, и стружка получается более плавнаго строения (сливная стружка); при большем угле резания сдвигъ элементовъ относительно другъ друга значительный, связь между элементами слабая, и вид самих элементовъ стружки переходитъ въ треугольный. Въ обоихъ случаяхь поверхность стружки, прилегающая къ резцу, имеетъ блестящий видъ, и поверхность обрабатываемаго предмета не имеетъ особенно заметных шероховатостей.